



TITLE:

平塚市上空の気流性状の数値シミュレーション

AUTHOR(S):

丸山, 敬

CITATION:

丸山, 敬. 平塚市上空の気流性状の数値シミュレーション. 第15回風工学シンポジウム論文集 1998: 137-142

ISSUE DATE:

1998-12

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/244146>

RIGHT:

発行元の許可を得て登録しています.

平塚市上空の気流性状の数値シミュレーション NUMERICAL SIMULATION OF WIND FLOW OVER HIRATSUKA CITY

丸山 敬
Takashi MARUYAMA

ABSTRACT

A turbulent flow over a real city: Hiratsuka, was calculated by a refined $k-\epsilon$ turbulence model which incorporates the effect of surface roughness using configuration of roughness elements, i.e. buildings and houses. The calculated results were compared with the observed data and examined. The calculation simulates the deceleration of wind speed and the acceleration of the generation of kinetic energy near the ground where the buildings are densely distributed. The high speed wind flow along the river was also calculated.

Keywords : urban city, $k-\epsilon$ turbulence model, flow field, numerical simulation

1. はじめに

筆者ら^{1,2)}は市街地のような複雑な凹凸をもつ粗面上において、 $k-\epsilon$ 型の2方程式乱流モデルを用いた強風中立時の気流性状の計算手法の開発を進めてきた。これまで、実際の市街地上空における計算結果と観測結果の比較によりその有効性および適用範囲の検証を行った³⁾が、その際比較の対象となった観測値は上空80mまでのもので割合地面に近く、最大風速も約6m/sと低風速時のデータであった。一方、近年ドップラーソーダ等による風速分布の観測が都市域においても盛んに行われるようになり、観測データが蓄積されつつある。平塚市においても大気境界層研究会の観測グループによってドップラーソーダを用いた2地点での同時観測が行われ、強風時の観測データを含む流れ方向に約7.5km離れた異なる2地点での同時観測データが得られている⁴⁾。その記録によると、高度約400mまでの風速分布が観測され、平均風速も上空で約20m/sと強風時の観測データが得られている。

ここでは、上述の観測地点を含む平塚市に計算領域を設定し、実際の建物形状データを読み込んで数値計算に必要な粗度パラメータの値を求め、上空の気流性状の3次元計算を行った。計算結果は観測データと比較検討され、計算結果を用いて平塚市上空の気流性状の検討を行った。

2. 計算手法

計算方法は文献³⁾と同様に、植物および都市キャノピー内で粗度形状を体積変化の影響を含めてモデル化した $k-\epsilon$ 2方程式型の乱流モデル^{1,2)}を用いた。計算領域は図1に示す平塚市と茅ヶ崎市にまたがる範囲で、ドップラーソーダによる観測地点を含む。地表面粗度形状は図2に示す領域において住宅地図、航空写真および現地調査により建物の水平断面形状と階高を数値データとして読み込んだ。計算領域の南には相模湾が広がり、南からは海上を吹い

京都大学防災研究所 助教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

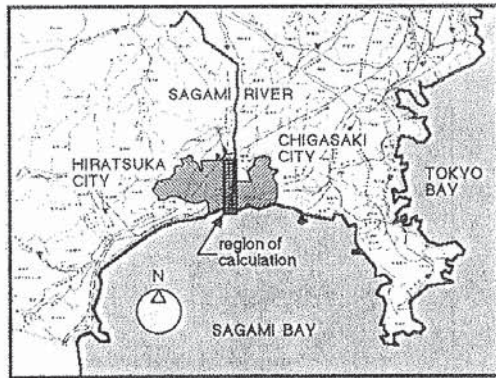


図1 計算領域

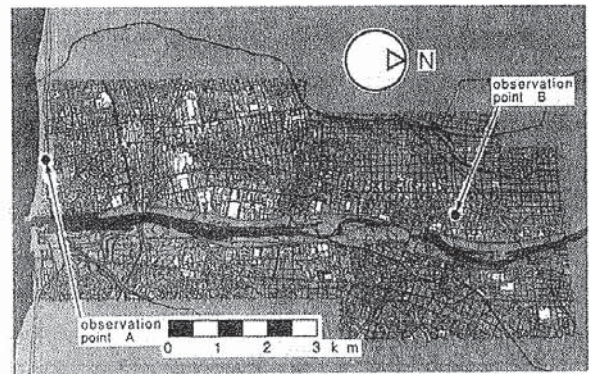
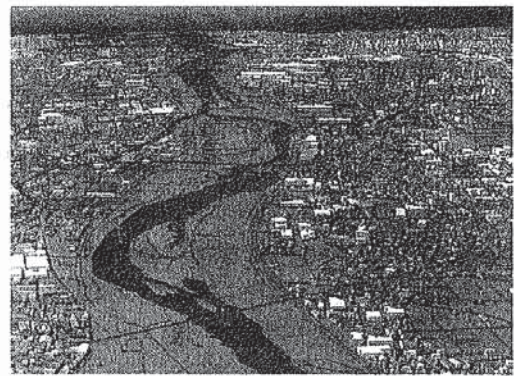


図2 建物形状を数値データとして読み込んだ領域



a. 海から陸を見る



b. 陸から海を見る

図3 地表面の粗度形状

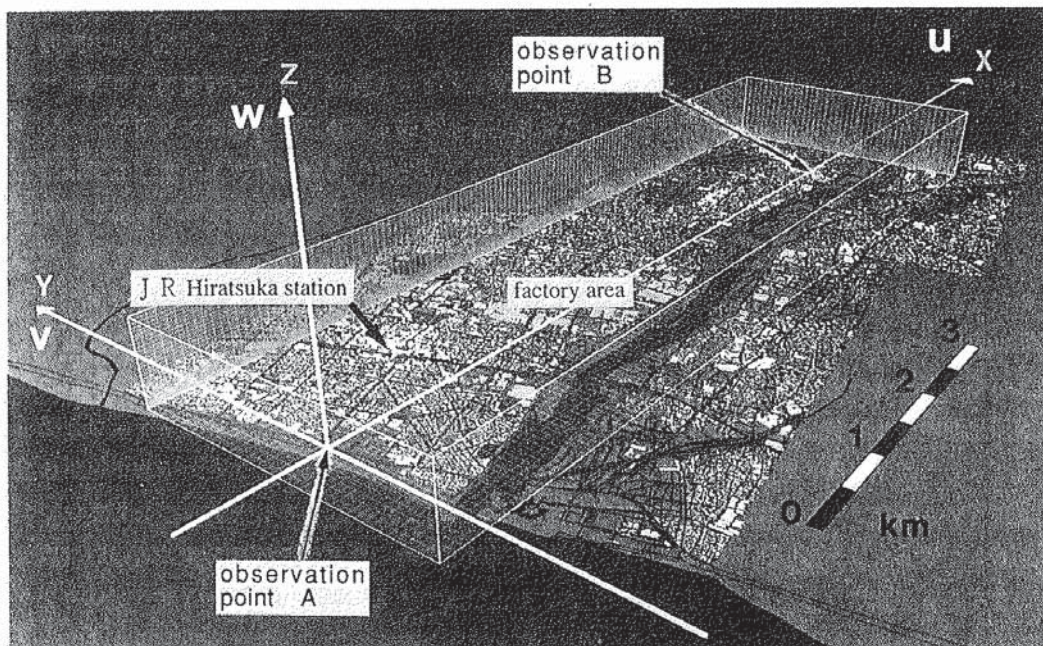


図4 解析領域内の座標系とメッシュ分割

てきた風が流入する。海岸線の道路に沿っては松の防風林が広がり、その他、計算領域に含まれる公園や河原にも各種樹木が生えているが、計算に必要な樹木の粗度パラメータが不明なので、樹木の影響は考慮せず無いものとして計算した。このようにしても、地面付近で樹木の密度が高い部分を除いては、樹木の影響は建物に比べて小さく、計算結果に大きな違いは無いと考えた。図3,4に示すように、建物の形状データを読み込んだ領域は平塚市の市街地を含み、JR平塚駅を中心とした中高層ビル街および住宅街、北側の工場地区の大規模な建物群、さらに北側の農耕地および、平塚市の東に流れる相模川を越えて、茅ヶ崎市・寒川町の一部を含む。

上記のデータにより、計算に必要な粗度の体積密度、表面積密度、抵抗係数および乱れの長さスケールの値等、各種パラメータの値を文献3)と同様な方法で各計算格子点において求めた。なお、水面、河原、農耕地等建物の存在しない地面境界面において植物は無視し、滑面上の壁面境界条件、すなわち、地面第一セルで、水平方向風速分布に関してはべき法則（べき指数 $1/7$ ）が成り立つとし、エネルギーの消散率 $\varepsilon = K^{3/2} C_D^{3/4} / \kappa z_1$ とした。ここで、 K は乱流エネルギー、 $C_D=0.09$ 、 $\kappa=0.4$ 、 z_1 は地面第一セルの中心高さである。また、変数はMAC法に基づくスタッガード配置を用い、計算領域外部の仮想セル上で $\partial u / \partial x$ がべき法則をみたすように、また、 $\partial K / \partial z = \partial \varepsilon / \partial z = 0$ 、 w は地面境界上で0となるように与えてある。

計算領域は図4に示すように、南北方向に細長い $x \times y \times z = 8.9 \times 2.8 \times 0.7 \text{ km}^3$ の範囲で、ほぼ南北方向に x 軸を、東西方向に y 軸を、鉛直方向に z 軸をとった。ドップラーソーダによる観測点は図2,4に示すように、海側の観測点Aと陸側の観測点B（水平距離で約7.5km）の合計2ヶ所である。計算格子の大きさは文献3)より、水平面内の平均化面積を一辺が70mの正方形とし、水平方向に等間隔とした。鉛直方向の分割幅は風洞内の粗度上に発達した乱流境界層上の3次元計算⁵⁾で、水平方向の1/20まで安定して計算ができることがわかっているため、鉛直方向には地面付近で一辺3.5m、上方にいくほど格子幅が大きくなる不等間隔格子を用いた。格子点数は x, y, z 軸方向に $127 \times 40 \times 39$ 、合計198,120点である。地面付近の粗度形状の影響は粗度の体積密度、表面積密度、抵抗係数および乱れの長さスケールとして組み込まれ、計算に必要なパラメータの値は、各格子点における空間平均値として求められる。また、側面、上面および下流面では、各物理量の空間勾配が各境界面の法線方向に零である自由流出境界条件を用いている。計算は上流が単純な粗度形状をもった海となる南風を解析対象とし、事前に本計算と同様な手法で乱流境界層を発達させたときの計算結果を流入境界条件として用いた。

3. 観測結果

今回計算結果との比較に用いる観測データは、図2,4に示す観測点A（海側）と観測点B（陸側）においてドップラーソーダを用いて同時観測されたものである。計算は $k-\varepsilon$ 型の2方程式乱流モデルを用いており、強風中立時の気流を対象としているので、観測データもできるだけ高風速時のものがよい。また、流入境界条件として与える気流は計算で発生させることを考え、上流の地面境界条件が簡単な海側からの流れを用いることにしたので、観測データは海風を対象とする。以上を考慮して、観測期間中に得られた観測結果のうち、台風9707号の通過時におけるデータを用いることにした。このときの観測結果は図5に示すように、台風の接近に伴い地上付近で平均風速がそれぞれA地点（地上12m）で最高24m/s、B地点（地上15m）で最高16m/sに達する風速を記録し、その間の風速の鉛直プロファイルが毎10分ごとに10分間平均値として得られている。そのうち、10時から15時までの毎正時の観測結果を図6に示す。10分間平均風速の鉛直プロファイルの形状に関しては、全体の傾向として高風速時ほど高さ方向の風速のばらつきが大きくなり、プロファイルの傾きが小さくなって上下の風速の差が小さくなっている。高風速時に鉛直プロファイルの勾配が小さくなることは自然風の観測結果においてもみられる⁶⁾ので、今回の観測でも同様な傾向が現れていると考えられる。また、14時以降風下側の風速が風上側の風速よりも全高度で速くなる結果となっている。さらに、記録されたプロファイルの中には上空で地上よりも風速が減少している場合があり、それは高風速時に多くみられる。この理由として、上空から高風速の空気塊が降りてくる、いわゆるスィーフ⁷⁾のような現象の発生頻度が多くなっているとも考えられる。しかし、風速が高くなってノイズが大きくなると、データ取得率が低

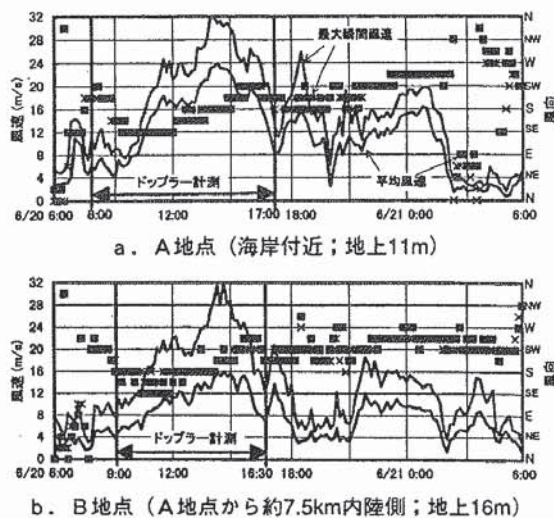


図5 台風9707号通過時の地上付近の三杯風速計の記録

下するドップラーソーダの特徴を考慮すると、風速の高い高高度では観測される風速値が相対的に小さくなっている可能性もある。したがって、計算との比較に用いるデータは、鉛直プロファイルの形状から判断してあまり風速が高くないときの結果（午前10～11時頃のもの）を用いることにした。なお、観測データの性質、評価方法に関する検討の詳細は文献⁴⁾を参照されたい。

4. 観測結果との比較

流入境界条件として与える気流性状は、事前に本計算と同様な手法で乱流境界層を発達させ、水平方向平均風速の鉛直分布形状が前章で選んだ台風接近時の観測結果を最もよく近似するようになったときの計算結果を用いた。計算は図7に示すように、観測点Aにおける観測結果を近似する種々の流入気流に対して行った。図に示すように、風上側の観測点Aにおける平均風速の鉛直分布を計算は良く近似する。下側の観測点Bについては、10時、11時ともに10分後の観測値の方が計算値に近い。これは、観測点間の吹送時間によるずれと考えられる。上空では観測点Bの方が風速が低くなる様子も計算は再現している。また、10時の結果では高度100m以下で風速勾配が小さくなり、特に、観測点A 11時、B 11時10分の結果では高度100m付近で観測点A,Bの風速が近づき、また、100m以下で風速勾配が大きくなる様子が計算でも捉えられている。計算結果が完全に観測結果と一致しない理由としては、建物が無い部分での壁面境界条件の与え方、建物の密な領域での乱流モデルの不備、植物の取り扱い、観測データが得られている高度よりも上空の気流性状の影響等が考えられるが、各原因の影響は今のところはっきりしていない。いずれにせよ、図7に示される程度に、計算結果は下流方向への風速の変化を再現している。

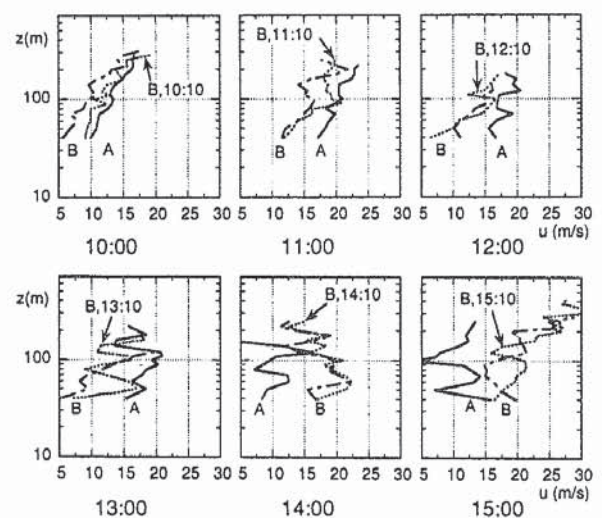
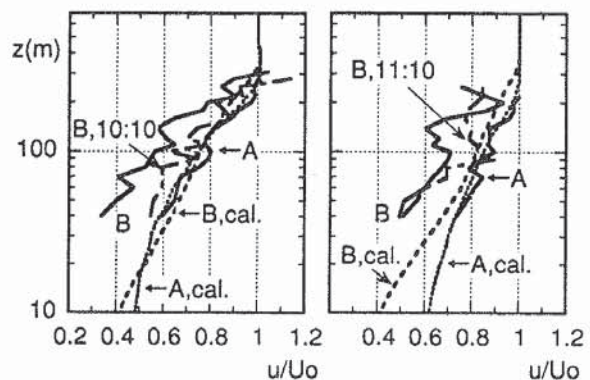


図6 観測点A,Bにおける10分間平均水平方向風速の鉛直プロファイルの時間変化（B点については毎正時10分後のデータも示してある）



a. 10時の観測値との比較 b. 11時の観測値との比較

図7 観測点における水平方向平均風速の比較（観測点Aで、それぞれ10時と11時の観測結果を計算値が最もよく近似するように流入気流性状を最適化したときの計算結果を示す。また、B点については毎正時10分後のデータも示してある；観測結果——、計算結果-----）

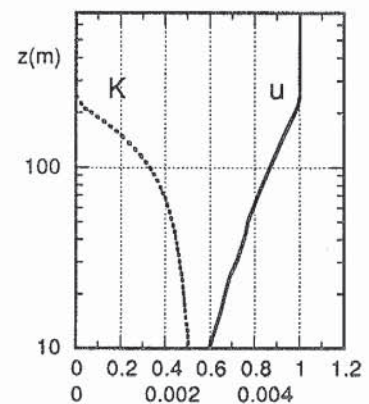


図8 流入境界面における平均風速 u および乱流エネルギー K の分布（11時の観測値に最適化したときの値を流入境界面で一様に与える）

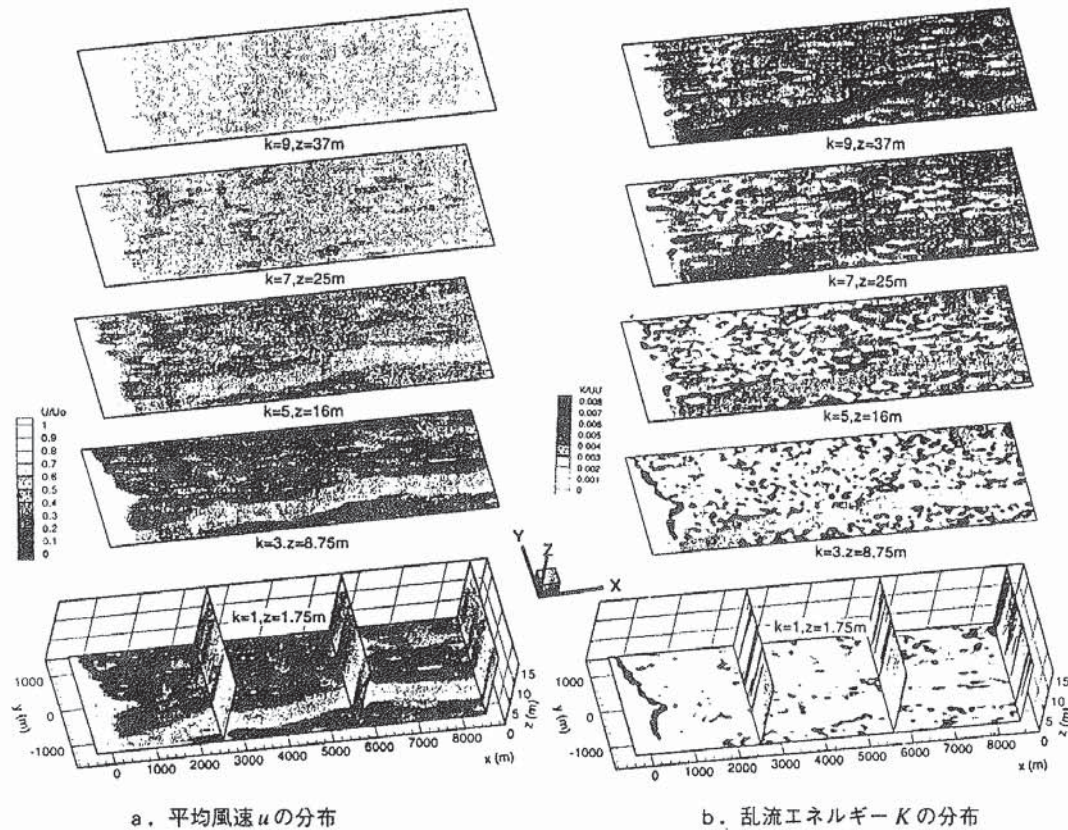


図9 計算結果（11時の観測値に最適化された流入境界条件を用いた場合）

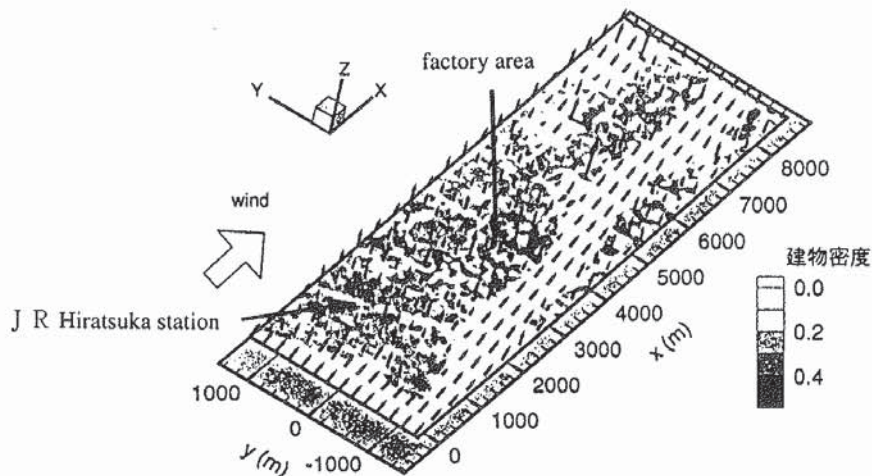


図10 地面付近の建物密度と風速ベクトルの分布, $z=1.75\text{m}$ (ベクトルの鉛直方向のスケールは水平方向の20倍)

5. 計算結果

以下では解析領域全体の計算結果をもとに、平塚市上空の気流性状を検討する。ここで用いた流入境界条件は図7に示す11時の観測点Aにおける測定値に最適化したときの流入気流で、その平均風速 u (x 方向成分)と乱流エネルギー K の流入境界面での分布を図8に示す。図中 u および K は流入境界面中央上部の基準風速 U_0 により無次元化してある。

図9に示す解析領域全体の計算結果をみると、海側から入ってきた風は海岸付近の住宅地で急激に風速が落ち、

建物が高く、密度が大きいJR平塚駅付近および、工場や倉庫が立ち並ぶ解析領域中央付近に低風速域が広がっている。一方、地表面粗度が小さく、抵抗の小さい川筋に沿った部分では、風速が周囲に比べて相対的に高くなっている。平均風速の分布は、高さ37mでx軸方向に直角水平方向にはほぼ一様な分布を示すようになっている。JR平塚駅付近の建物が高いところでも、建物高さは最高約30m、平均約20mであるから、文献3)の結果にも示されるように、平均風速の分布形状は付近の建物高さの約1.5倍以上ではほぼ一様な分布を示し、その値は付近の時空間平均風速分布を表していると考えられる。

一方、乱流エネルギーは風速変化の激しい領域、とくに風速が急激に減少する部分で高くなり、大きな乱れが発生していることがわかる。この風速が急激に減少する部分は流れ方向に建物密度が高くなる場所に相当しており、図10に示すように、そのような場所では地面付近で平均的に上空に向かう流れが生じている。これにより、地面付近で生じた乱れが上空に運ばれ、風下に拡散することになる。このとき、乱れのエネルギーは平均風速の分布とちがって、かなり高高度まで不均一さがみられる。また、上空では川の上方で相対的に乱れが強くなる結果となっているが、乱流エネルギーの生成には速度勾配だけでなく、乱れにエネルギーを供給するための平均流のもつエネルギーが大きいことも必要であることがわかる。なお、図10中建築密度とは単位体積中に建物の占める割合を表す。

6. まとめ

粗度形状の影響を取り込んだk- ϵ 2方程式型の乱流モデルを用いて、平塚市における市街地上空の気流性状の数値計算を行った。計算結果と比較する観測データに関しては、台風接近時の強風時に海側から吹くデータを用いた。風上側の観測結果を近似するように計算で発生させた流入境界条件を用いた計算結果では、平均風速の値が風下側の観測点で測定結果よりも大きくなったが、流れ方向の風速の減少と、鉛直分布の勾配の変化は定性的に一致した。また、計算結果は建物が密集している地域での風速の減少と乱れの増加、川筋にそった強風域を再現し、複雑な粗度形状をもつ市街地上空での気流性状の検討を行うことができた。

今回行った計算では、地面境界条件の与え方、建物の密な領域での乱流モデルの取り扱い、上空の気流性状の影響等、実際の条件を十分に再現できなかった。また、観測データの処理に際して、風向や風速、平均化時間の評価方法等結果に影響する要因が多く、計算結果との比較に適したデータの抽出方法に関しても今後検討を続けて行く予定である。

謝 辞

本研究は大気境界層研究会（代表：田村幸雄・東京工芸大学）の活動の一部として行われ、観測資料の提供を受けた。また、建物データの処理および表示には株式会社プラス・ワンの協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 平岡久司・丸山 敬・中村泰人・桂 順治：植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究（その1）、日本建築学会論文報告集, 第406号, pp.1-9, 1989.
- 2) 平岡久司・丸山 敬・中村泰人・桂 順治：植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究（その2）、日本建築学会論文報告集, 第416号, pp.1-8, 1990.
- 3) 丸山敬：市街地上空における気流性状の数値計算, 日本建築学会構造系論文報告集, 第474号, pp.49-58, 1995.
- 4) 菅沼信也ら：ドップラーソーダーを用いた地表面粗度の異なる地点の風速鉛直分布に関する研究（その8～12）、日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造B-1, pp.147-148, 1998.
- 5) 丸山 敬（1992）：乱流境界層風洞の数値シミュレーション, 日本建築学会構造系論文報告集第437号, pp.135-141.
- 6) Ishizaki, H. : Wind profiles, turbulence intensities and gust factor for design in typhoon-prone regions, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.13, pp.55-66, 1983.
- 7) Chen, F. : Turbulent characteristics over a rough natural surface part II, Boundary-Layer Meteorology, Vol.52, pp.301-311, 1990.